

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۱/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۶/۰۹

## بهبود شاخص اثربخشی مصرف انرژی در مراکز داده با استفاده از فنون DVFS و مجازی سازی

رسول صادقی\*

استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دولت آباد، اصفهان، ایران.  
پست الکترونیکی: r.sadeghi@iauda.ac.ir

محمد جواد بابائی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده کامپیوتر، مؤسسه آموزش عالی علوم و فناوری سپاهان، اصفهان، ایران.  
پست الکترونیکی: mjbabaei@yahoo.com

چکیده:

استفاده از خنک‌کننده‌های هوشمند می‌توان مصرف انرژی و شاخص PUE را بهبود بخشید. **واژه‌های کلیدی:** مرکز داده، مجازی‌سازی، فن DVFS، شاخص PUE، شاخص NPUE.

هدف اصلی این پژوهش بررسی میزان کاهش مصرف انرژی در مراکز داده با استفاده از فنون مجازی‌سازی و مقیاس‌بندی پویای ولتاژ و فرکانس (DVFS) است. فن DVFS این قابلیت را به کارسازهای فیزیکی و همچنین ماشین‌های مجازی می‌دهد که در زمان کاهش درخواست منابع، مصرف انرژی کمتری داشته باشند. در این پژوهش، با ارائه چندین سناریو به تاثیر تعداد ماشین‌های مجازی و نیز فعال‌سازی یا عدم فعال‌سازی ویژگی DVFS در میزان مصرف انرژی در مراکز داده پرداخته می‌شود. همچنین با استفاده از مقدار توان مصرفی کارسازها، سوئیچ‌ها و نیز تجهیزات جانبی مرکز داده (نظیر خنک‌کننده و روشنایی) شاخص‌های PUE و NPUE محاسبه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از شبیه‌ساز گرین کلود نشان می‌دهد که با استفاده از فنون DVFS و مجازی‌سازی می‌توان تا حدود ۶۰ درصد در مصرف انرژی مراکز داده صرفه‌جویی نمود. این پژوهش نشان می‌دهد چگونه با

### ۱- مقدمه

امروزه با رشد روزافزون فناوری اطلاعات و گسترش آن، شاهد تولید انبوه اطلاعات در سطح شبکه‌های جهانی هستیم که برای ذخیره‌سازی به سمت مراکز داده ارسال می‌گردد. مراکز داده، محل نگهداری تجهیزات انتقال، ذخیره‌سازی و پردازشی فناوری اطلاعات است. حیات این مراکز به انرژی الکتریکی وابسته است و تولید این انرژی با هزینه زیاد و آسیب به محیط زیست انجام می‌گردد. بنابراین یکی از گام‌هایی که در راستای حفاظت از محیط زیست برداشته می‌شود، بهینه‌سازی مصرف انرژی در مراکز داده است.

رقابت بر سر ارائه کیفیت خدمات (QoS)<sup>۱</sup> بالاتر در بازه

1- Quality of Service (QoS)

\* نویسنده مسئول

توافق نامه سطح خدمات<sup>۲</sup> با حداقل قیمت از عوامل تأثیرگذار بر قیمت تمام شده خدمات در مراکز داده و همچنین هزینه تأمین انرژی است [۸]. از آنجایی که هزینه تأمین انرژی مرکز داده در هر فوت مربع در حالت عادی ۱۵ برابر و در موارد بحرانی ۴۰ برابر [۴] و حتی ۵۰ برابر [۵] یک ساختمان اداری معمولی (معادل مصرف برق ۲۵۰۰۰ خانوار [۶]) است، مراکز داده یکی از نقاط پرمصرف انرژی در سراسر جهان محسوب می‌شود. لذا موضوع بهینه‌سازی مصرف انرژی در این مراکز ارتباط مستقیم با کاهش هزینه‌ها و به دنبال آن، قیمت تمام شده خدمات دارد. در اروپا، پیش‌بینی شده مصرف برق مراکز داده تا ۹۳ تراوات ساعت در سال ۲۰۲۰ برسد که تقریباً ۷۵٪ از این مقدار به مصرف تجهیزات فناوری اطلاعات و خنک‌کننده می‌رسد و ۲۵٪ باقیمانده در سیستم توزیع برق و تأسیسات تلف می‌شود [۷]. در ایران نیز سیاست‌گذاری‌های متعددی در زمینه بهبود مصرف انرژی انجام شده است [۱] [۲] [۳].

حدود نیمی از کل برق مصرفی در مراکز داده توسط سیستم‌های خنک‌کننده جهت دفع حرارت تولید شده توسط کارسازها و تجهیزات ارتباطی استفاده می‌شود [۶]. تمرکز اصلی در سال‌های اخیر برای کاهش مصرف برق این مراکز بر روی کنترل حرارت با استفاده از روش‌های جدید است. استفاده از خنک‌سازی رایگان با استفاده از هوای خنک خارج از مرکز داده در فصول سرد سال و یا استفاده از آب دریا از جمله این روش‌هاست [۱۱-۱۲]. بهترین روش برای کاهش مصرف انرژی در مراکز داده، استفاده از تجهیزات کم‌مصرف و نیز استفاده کمتر از تجهیزات سخت‌افزاری با استفاده از انتقال کارسازهای فیزیکی به بسترهای مجازی است و در نتیجه هم مصرف مستقیم برق توسط تجهیزات فناوری اطلاعات کاهش یافته و هم میزان مصرف برق تجهیزات خنک‌کننده برای دفع گرمای تولید شده به حداقل می‌رسد [۱۱]. همچنین با رشد و توسعه صنعت سخت‌افزار و تمرکز تولید کنندگان بر بهره‌وری بالای تجهیزات و

کاهش میزان مصرف انرژی، تا حد زیادی مصرف بی‌رویه انرژی کنترل شده است [۱۴]. از طرفی، با کاربردی‌تر شدن فناوری‌های جدید نرم‌افزاری نظیر مجازی‌سازی<sup>۴</sup>، تعداد سخت‌افزارهای مورد نیاز در مراکز داده روبه کاهش است و با تجمیع کارسازهای متعدد فیزیکی در یک کارساز، میزان استفاده بهینه از سخت‌افزار و انرژی در مراکز داده بهبود یافته است [۱۵].

مسئله‌ای که در این مقاله بر روی آن تمرکز می‌نماییم، حذف کارسازهای فیزیکی و ادغام چندین کارساز فیزیکی در یک کارساز قوی‌تر و انجام عملیات مجازی‌سازی است. در این روش با حذف کارسازهای فیزیکی، میزان مصرف انرژی کارسازها کاهش یافته و به دلیل کاهش تعداد کارسازها، گرمای کمتری نیز در مرکز داده تولید می‌شود و در پی آن انرژی کمتری نیز صرف تجهیزات خنک‌کننده مرکز داده شده، لذا شاهد کاهش مصرف انرژی به صورت مضاعف در مرکز داده خواهیم بود. به بیان دقیق‌تر، میزان تأثیر مجازی‌سازی را با ترکیب مقیاس‌بندی پویای ولتاژ و فرکانس (DVFS<sup>۵</sup>) بر بهره‌وری و کارایی مراکز داده از نقطه نظر مصرف انرژی ارزیابی می‌کنیم. تلفیق روش DVFS با روش مجازی‌سازی این ویژگی را دارد که یک بار بر روی کارساز فیزیکی اقدام به فعال‌سازی DVFS می‌نماییم و یکبار بر روی ماشین مجازی و در دو سطح اقدام به بهینه‌سازی ولتاژ و فرکانس پردازنده‌های فیزیکی و مجازی می‌کنیم. بدین منظور دو شاخص مهم انرژی شامل PUE<sup>۶</sup> و NPUE<sup>۷</sup> برای بررسی میزان تأثیرگذاری کاهش مصرف انرژی به کمک شبیه‌ساز گرین کلود محاسبه و مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

نوآوری این مقاله نسبت به پژوهش‌های موجود در این زمینه، در تلفیق روش مجازی‌سازی و DVFS و محاسبه همزمان شاخص‌های PUE و NPUE و تحلیل آن است. با استفاده از ویژگی DVFS در زمان‌هایی که بار کمتری بر

4- Virtualization

5- Dynamic Voltage and Frequency Scaling

6- Power Usage Effectiveness

7- Network Power Usage Effectiveness

2- Service Level Agreement (SLA)

3- Server

روی کارسازهای محاسباتی وجود دارد اقدام به کاهش فرکانس و ولتاژ مصرفی پردازنده‌ها می‌شود. در این صورت میزان مصرف انرژی این کارسازها به میزان قابل توجهی در زمان‌های کم باری و بیکاری کاهش خواهد یافت. ارزیابی و تحلیل نتایج این پژوهش می‌تواند راهبرد مناسبی برای افزایش کارایی زیرساخت مراکز داده باشد که این موضوع در هیچ یک از پژوهش‌های پیشین مورد بررسی و تحقیق قرار نگرفته است.

ساختار این مقاله به این صورت است که در بخش دوم به مرور پیشینه پژوهش اختصاص داده می‌شود. در بخش سوم تعاریف مجازی‌سازی، فن DVFS و شاخص‌های PUE و NPUE و نحوه محاسبات آن در یک مرکز داده فرضی ارائه می‌گردد. سپس سناریوهای شبیه‌سازی، ارزیابی و تحلیل آن‌ها در بخش چهارم و همچنین نتایج این پژوهش در بخش پنجم شرح داده می‌شود.

## ۲- پیشینه پژوهش

به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی در مراکز داده فنون متعددی نظیر مدیریت بار، زمانبندی کار و توزیع بار، تکرار داده<sup>۸</sup>، DVFS، انتقال سرویس دهنده‌ها و سرویس گیرنده‌ها به حالت مصرف کم برق، فنون وابسته به مدیریت حرارت، مجازی‌سازی و زمانبندی ماشین‌های مجازی مطرح شده است. به‌طور کلی روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در مراکز داده به چهار دسته تقسیم می‌شود: روش‌های مبتنی بر سخت‌افزار، روش‌های مبتنی بر برق، روش‌های مبتنی بر مدیریت حرارت و روش‌های نرم‌افزاری.

در روش‌های مبتنی بر سخت‌افزار تمرکز بر روی استفاده از سخت افزارهای کم مصرف است [۱۶]. ییران ژاو<sup>۹</sup> و همکاران اقدام به استفاده از ریزکارسازهایی نموده‌اند که حداقل توان مصرفی پردازشی را دارند و مصرف برق آن‌ها کمتر از یک وات است [۱۳]. این روش برای مراکز داده‌ای مناسب است که در مرحله طراحی هستند، اما در مراکز که در حال کار است و قبلاً طراحی و پیاده‌سازی شده

است، استفاده از این ریزکارسازها روش پرهزینه‌ای خواهد بود. زیرا باید کلیه تجهیزات پرمصرف با تجهیزات به‌روز و کم‌مصرف تعویض شود که عملاً برای اکثر سازمان‌ها امری غیرممکن است.

روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر برق به این صورت عمل می‌کنند که در زمان‌های خاصی که تجهیزات نیاز به توان مصرفی اسمی خود ندارد، ولتاژ به‌صورت پویا کاهش می‌یابد و در زمان‌هایی که پردازشگرها نیاز به توان پردازشی بیشتری دارند به ظرفیت و توان اسمی خود بازمی‌گردند. این روش همان DVFS نام دارد [۱۷]. البته این قابلیت باید در تجهیزات وجود داشته باشد که از ولتاژ پویا پشتیبانی نماید. در غیر این صورت باید از روش دیگر به نام DCD<sup>۱۰</sup> استفاده نمود که تجهیزات در زمان بیکاری به حالت خواب می‌رود [۱۸]. در مجازی‌سازی مراکز داده این قابلیت وجود دارد که از این روش برای بهینه‌سازی مصرف انرژی بر روی ماشین‌های مجازی استفاده نمود. ژاو تنگ<sup>۱۱</sup> و همکاران در پژوهشی با استفاده از روش DVFS و معرفی الگوریتم DEWTS توانسته‌اند با برنامه‌ریزی فعالیت‌ها و انجام آن در زمان کسادی<sup>۱۲</sup>، منابع بهره‌وری مصرف انرژی را بهبود بخشند.

روش‌های مبتنی بر حرارت با استفاده از جابه‌جایی هوا و جلوگیری از مخلوط هوای سرد و گرم، سعی در کاهش مصرف انرژی در مراکز داده می‌نماید [۱۳]. با توجه به این‌که حدود ۳۵ تا ۵۰ درصد کل انرژی وارد شده به مرکز داده صرف خنک‌کردن این مراکز می‌شود [۷]، بنابراین تمرکز بر روی انتقال گرما و کاهش هزینه خنک‌سازی می‌تواند به کاهش هزینه انرژی در مرکز داده منجر گردد [۱۹]. از روش‌های اجرایی رایج در این بخش می‌توان به راهرو سرد بسته، راهرو گرم بسته و سیستم خنک کننده اختصاصی برای هر قفسه اشاره نمود [۲۰-۲۱]. در یکی از جدیدترین روش‌ها بحث «استفاده مجدد از انرژی»<sup>۱۳</sup> مطرح می‌گردد که در آن با انتقال گرمای تولیدی تجهیزات فناوری اطلاعات

10- Dynamic Component Deactivation

11- Zhuo Tang

12- Slake Time

13- Energy Reuse

8- Data Replication

9- Yiran Zhao

مرکز داده به سایر ساختمان‌ها و دفاتر، از آن به عنوان سیستم گرمایشی بهره می‌برند [۲۲] و با توجه به این‌که عموماً مراکز داده را به منظور استفاده از سیستم خنک‌کننده رایگان در مناطق سردسیر بنا می‌کنند، یک روش اقتصادی مفید برای پایین آوردن هزینه‌های انرژی‌های سرمایشی و گرمایشی است. محققان در این روش به کاهش ۲۷ درصدی مصرف انرژی در مرکز داده دست یافته‌اند [۲۳]. اما نکته حائز اهمیت این است که در محاسبات شاخص اثربخشی انرژی (PUE) در مرکز داده، میزان انرژی مجدد استفاده شده به حساب آورده نمی‌شود و برای اندازه‌گیری میزان این صرفه جویی از شاخص دیگری به نام اثربخشی استفاده مجدد از انرژی» (ERE<sup>۱۴</sup>) استفاده می‌شود [۲۴].

روش‌های نرم‌افزاری به چند شیوه پیاده‌سازی می‌شود. یکی از این روش‌ها به این صورت است که با برنامه ریزی و زمانبندی بتوانیم ساعات اوج مصرف را به زمان‌هایی منتقل کنیم که کارسازها وظایف کمتری را بر عهده دارند [۷]. مثلاً فرایندهایی نظیر پشتیبان‌گیری و همگام‌سازی [۲۵] که مستلزم عملیات پردازشی و ورودی-خروجی زیادی است، در ساعات پایانی شب انجام شده که هم تعرفه برق ارزان‌تر است و هم سایر کارسازها از بار عملیاتی کمتری برخوردارند [۲۶]. رحمتی و همکاران در اقدامی به ترکیب دو روش برنامه‌ریزی وظیفه‌ها و تکرار داده‌ها نموده‌اند که با کاهش زمان دسترسی نهایتاً منجر به کاهش میزان مصرف انرژی در سطح مرکز داده خواهد شد [۲۷] یکی دیگر از روش‌های مطرح شده و موفق نرم‌افزاری برای بهینه‌سازی مرکز داده، روش مجازی‌سازی منابع سخت‌افزاری است. در این روش با استفاده از کارسازهای قدرتمند تیغه‌ای<sup>۱۵</sup>، چندین کارساز فیزیکی را بر روی یک کارساز قدرتمند به صورت مجازی پیاده‌سازی می‌کنیم [۲۸]. همچنین، رشمی رای<sup>۱۶</sup> و همکاران در پژوهشی با استفاده از روش‌های MedMT<sup>۱۷</sup> و MaxUT<sup>۱۸</sup> و HP<sup>۱۹</sup> در مجازی‌سازی اقدام به پیاده‌سازی و

مقایسه آن در طول مدت ۷ روز نموده‌اند که نتایج آن حاکی از بهبود مناسب مصرف انرژی در روش مجازی‌سازی است.

خلاصه روش‌های فوق در جدول ۱ ارائه شده است. هرکدام از این روش‌ها به نوبه خود در کاهش هزینه‌های سربرار مرکز داده مؤثر هستند و نمی‌توان با قاطعیت اعلام کرد که یک روش بهینه وجود دارد. اما در یک مرکز داده، پتانسیل استفاده از یک یا چندین روش وجود دارد. مثلاً ممکن است در یک مرکز، بودجه کافی برای تعویض کارسازها و تجهیزات قدیمی وجود نداشته باشد، اما با کمی تغییرات بر روی سیستم توزیع برق یا تهویه مرکز داده بتوان به میزان قابل قبولی از بهبود کارایی دست یافت. در این پژوهش با توجه به گستردگی روش‌ها، ما تمرکز خود را بر روی مجازی‌سازی قرار می‌دهیم. زیرا مجازی‌سازی بخش جداناپذیر معماری مرکز داده سبز است [۳۰] و با توجه به پشتیبانی نرم‌افزارهای مجازی‌سازی از روش DVFS برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، با استفاده از تلفیق روش DVFS با مجازی‌سازی، تأثیر آن را بر روی شاخص بهره‌وری مرکز داده تحلیل می‌کنیم. با استفاده از تلفیق روش مجازی‌سازی با DVFS در هر گام از سناریو تعداد کارسازهای سخت‌افزاری را کاهش داده و تعداد ماشین‌های مجازی را اضافه خواهیم نمود و نتایج آن را با استفاده از شبیه‌ساز «گرین کلود<sup>۲۰</sup>» به دست می‌آوریم.

### ۳. روش پیشنهادی پژوهش

کاهش مصرف انرژی در مراکز داده در بخش زیرساخت با استفاده از روش‌هایی انجام می‌شود که تأثیر مستقیم بر روی زیرساخت‌های فیزیکی و مصرف‌کننده‌های انرژی دارد. بدین منظور ابتدا مروری بر تعاریف مجازی‌سازی و DVFS خواهیم داشت و در ادامه با شاخص‌های ارزیابی این پژوهش شامل PUE و NPUE و نحوه محاسبات آن آشنا خواهیم شد. سپس معماری فیزیکی و معماری منطقی مرکز داده فرضی را تشریح می‌کنیم.

14- Energy Reuse Effectiveness  
15- Blade Servers  
16- Rashmi Rai  
17- Median Migration Time  
18- Maximum Utilization  
19- Hotspot Migration Policy

جدول ۱: مقایسه روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی مراکز داده در پژوهش‌های پیشین

پژوهش	روش(های) بهینه‌سازی مصرف انرژی
[۲۶] [۹]	مدیریت بار و زمان بندی کار
[۱۰] [۱۳] [۳۴] [۸]	مدیریت حرارت
[۹] [۱۴]	سخت افزار
[۲۳] [۴]	شاخص‌های بهینه‌سازی (PUE)
[۱۵] [۳۰] [۳۳]	مجازی سازی
[۳۱]	ولتاژ و فرکانس پویا و انتقال کارساز و کلاینت‌ها به حالت ECO
[۷] [۱۳] [۳۵]	شاخص‌های بهینه‌سازی (PUE) + مجازی‌سازی
[۱۲]	مدیریت حرارت + شاخص‌های بهینه‌سازی (PUE)
[۱۶] [۳۲]	مدیریت بار و زمان بندی کار + تقسیم بار
[۲۵]	مدیریت بار و زمان بندی کار + ولتاژ و فرکانس پویا و انتقال کارساز و کارخواه‌ها به حالت ECO
[۱۷]	سخت افزار + ولتاژ و فرکانس پویا و انتقال کارساز و کارخواه‌ها به حالت ECO
[۲۸]	مدیریت بار و زمان بندی کار + مجازی‌سازی

مجازی‌سازی به معنای ایجاد یک نسخه مجازی از یک موجودیت حقیقی و فیزیکی است. مجازی‌سازی شبکه به معنای تجمیع منابع سخت‌افزاری در یک منبع پرقدرت و استفاده اشتراکی از آن توسط مصرف‌کننده‌های مجازی به منظور سرویس‌دهی به کاربران است.

در مراکز داده امروزی به دلیل سرعت رشد و توسعه پردازش اطلاعات، با استفاده از فناوری‌های جدید نظیر مجازی‌سازی، سعی در کاهش رشد فیزیکی مراکز داده است. اگر فناوری مجازی‌سازی به وجود نیامده بود، مراکز داده امروزی ده‌ها و یا حتی صدها برابر اندازه فیزیکی امروزی‌شان فضا اشغال می‌کردند. با استفاده از فن DVFS، در هنگام کم‌باری و یا بیکاری کارسازها، با کاهش فرکانس و ولتاژ پردازنده‌ها می‌توان مصرف انرژی تجهیزات را کاهش داد و در سطح مرکز داده به صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای از انرژی دست یابیم. فن DVFS قابلیت پیاده‌سازی بر روی پردازنده‌های مجازی

کارسازهای مجازی را نیز دارد. در برنامه‌های مجازی‌ساز این امکان وجود دارد که بتوانیم با فعال نمودن این گزینه در ساعات به اصطلاح کاهش کار پردازنده، آن را به حالت کم‌مصرف تغییر داد و با کاهش ولتاژ و فرکانس پردازنده، از مصرف بی‌رویه انرژی جلوگیری کرد. میزان کاهش ولتاژ و فرکانس متناسب با میزان فعالیت یا بیکاری پردازنده تنظیم می‌گردد.

یکی از شاخص‌های عمومی که به منظور اطلاع از میزان بهره‌وری زیرساخت مراکز داده استفاده می‌شود، شاخص PUE می‌باشد. این شاخص محبوب‌ترین معیار برای سنجش میزان اثربخشی برق مرکز داده می‌باشد [۴]. مقدار این شاخص بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$PUE = \frac{\text{Total Facility Power}}{\text{Total IT Power}} \quad (1)$$

که در این رابطه، Total Facility Power مجموع مصرف انرژی کلیه تجهیزات موجود در مرکز داده و Total IT Power جمع کل توان مصرفی تجهیزات فناوری اطلاعات است. مقدار PUE همواره بزرگ‌تر از یک بوده و هرچه این عدد بزرگ‌تر باشد به معنای ناکارآمدی طراحی مرکز داده است. مقدار PUE نشان می‌دهد که برای انتقال یا پردازش ۱ واحد اطلاعات، چند واحد انرژی صرف انتقال و پردازش آن و همچنین تجهیزات جانبی فناوری اطلاعات نظیر خنک‌کننده‌ها می‌گردد که این هزینه بالاسری فناوری اطلاعات است. میزان بهره‌وری مراکز داده مطابق جدول ۲ بر اساس شاخص PUE ارزیابی می‌شود [۱۵].

همچنین یکی دیگر از شاخص‌های مهم برای سنجش میزان مصرف انرژی در مرکز داده شاخص NPUE است. این شاخص نسبت توان مصرفی کل تجهیزات فناوری اطلاعات (Total IT Power) به توان مصرفی تجهیزات ارتباطی (Total Network Power) را نشان می‌دهد (رابطه ۲).

$$NPUE = \frac{\text{Total IT Power}}{\text{Total Network Power}} \quad (2)$$

شاخص NPUE نشان می‌دهد چه کسری از توان مصرف شده توسط تجهیزات فناوری اطلاعات به سیستم

جدول ۲: میزان بهره‌وری در مرکز داده [۳۴]

میزان بهره‌وری	PUE
خیلی غیر بهره‌ور	۳,۰
غیر بهره‌ور	۲,۵
بهره‌وری متوسط	۲,۰
بهره‌وری خوب	۱,۵
بهره‌وری بالا	۱,۲

ارتباطی اختصاص دارد. مقدار این شاخص همیشه بزرگ‌تر از واحد است و مثلاً  $NPUE=6$  نشان می‌دهد که از ۶ وات انرژی مصرفی برای تجهیزات فناوری اطلاعات، ۱ وات به تجهیزات شبکه اختصاص دارد و ۵ وات برای رایانش کارسازها مصرف می‌شود. هرچه NPUE به یک نزدیک باشد، نشان‌دهنده کارآمدن انرژی کارسازهاست. در این پژوهش، با شبیه‌سازی یک مرکز داده فرضی به محاسبه شاخص‌های PUE و NPUE می‌پردازیم.

مرکز داده شبیه‌سازی شده فرضی در این پژوهش در یک اتاق با ابعاد  $۴۲۰ \times ۳۱۰$  سانتی‌متر واقع شده است. قفسه‌های مستقر در این مرکز داده ۴ عدد و داخل سه قفسه، کارسازهای پردازشی و در داخل قفسه چهارم سوئیچ‌های ارتباطی مرکز داده قرار گرفته است. شکل ۱ فضای شماتیک دو بعدی و سه بعدی مرکز داده شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱-ب) مشاهده می‌شود، سیستم خنک‌کننده این مرکز داده دو دستگاه کولر دیواری است که هر دو آماده به کار هستند ولی در هر لحظه تنها یکی از آن‌ها در حالت فعال قرار دارد. معماری منطقی این مرکز داده شامل یک شبکه سه لایه استاندارد شامل یک دستگاه سوئیچ هسته<sup>۲۱</sup>، دو دستگاه سوئیچ تجمیع<sup>۲۲</sup> و سه دستگاه سوئیچ دسترسی<sup>۲۳</sup> با ظرفیت ۴۸ درگاه است که ارتباط ۱۴۴ کارساز را با شبکه برقرار می‌کند (شکل ۲).

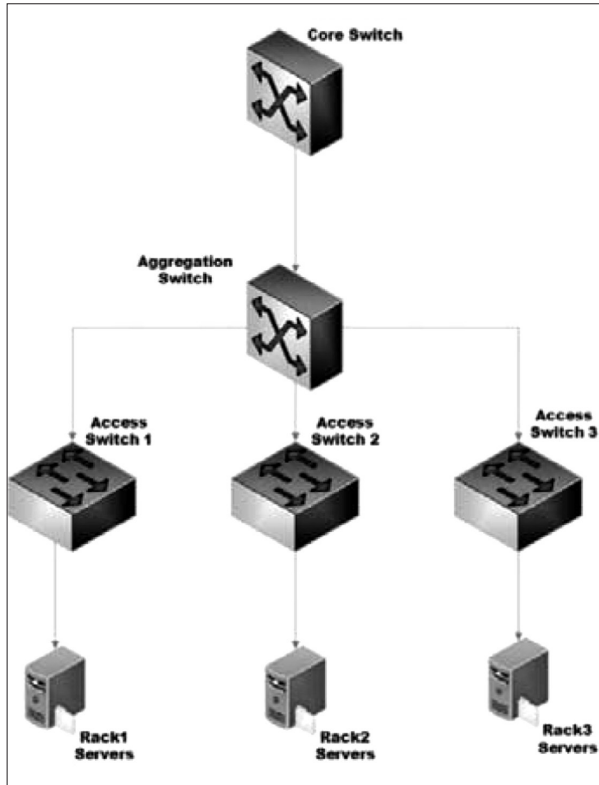
#### ۴. شبیه‌سازی و ارزیابی

از آنجایی که کار مراکز داده حیاتی است و قطعی سرویس در آن‌ها خسارات زیادی را در پی خواهد داشت، این امکان وجود ندارد که بتوان روش‌های پیشنهادی را بر روی یک مرکز داده در حال کار به منظور انتخاب بهترین روش پیاده‌سازی کرد. شبیه‌سازی مراکز داده با استفاده از ابزارهای کاربردی به منظور بررسی پیش از اقدام نتایج تغییرات مورد نظر در این مراکز انجام می‌پذیرد. این بدان معناست که در صورتی که به منظور بالا بردن بهینه‌کردن مصرف انرژی در مرکز داده قصد انجام تغییراتی با نتایج پیش‌بینی نشده را داریم، ابتدا باید با استفاده از یک ابزار شبیه‌ساز مناسب اقدام به شبیه‌سازی آن سناریو در نرم افزار نموده و نتایج و مشاهدات خود را در حالات مختلف ثبت و تحلیل نماییم. سپس بهینه‌ترین حالت را برای اجرا در مرکز داده واقعی انتخاب نماییم. در این بخش، ابتدا به معرفی شبیه‌ساز گرین‌کلود به عنوان شبیه‌ساز انتخابی برای اجرای سناریوی این پژوهش می‌نماییم و پس از آن روش اجرایی پژوهش انجام شده را به تفصیل بررسی می‌کنیم. در ادامه با نحوه محاسبات شاخص‌های ارزیابی و پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه این شاخص‌ها آشنا شده و این محاسبات را انجام خواهیم داد. همچنین، روش اجرای سناریو در شبیه‌ساز را بیان نموده و در نهایت با ارائه نتایج و مشاهدات خود به تحلیل آن‌ها می‌پردازیم.

امروزه ده‌ها ابزار برای شبیه‌سازی مراکز داده وجود دارد. در پژوهشی ۲ ابزار اندازه‌گیری و ۸ ابزار برای شبیه‌سازی برای مراکز داده انتخاب شده و مزایا و معایب آن‌ها را با نیاز باهم مقایسه شده است [۳۶]. از میان شبیه‌سازهای معرفی شده، شبیه‌ساز گرین‌کلود برای این پژوهش انتخاب شد. گرین‌کلود یک شبیه‌ساز مراکز داده رایانش ابری در سطح بسته است که قابلیت آگاهی از میزان مصرف انرژی با تمرکز بر ارتباطات ابری را ارائه می‌دهد. این شبیه‌ساز مدل‌سازی دقیق از انرژی مصرف شده توسط کارسازهای محاسباتی، سوئیچ‌های شبکه و

21- Core Switch  
22- Aggregation Switch  
23- Access Switch





شکل ۲: معماری منطقی مرکز داده فرضی

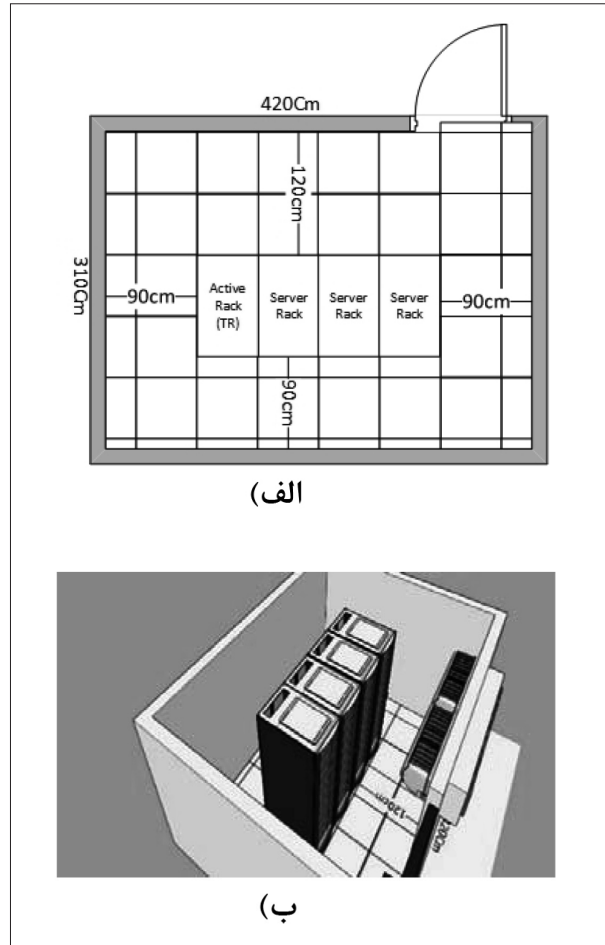
جدول ۳: مصرف برق تجهیزات فناوری اطلاعات (بر حسب وات)

توان مصرفی (بر حسب وات)	تجهیزات
۵۱,۴	سوئیچ هسته
۱۰۲,۸	سوئیچ‌های تجمیع
۹,۱	سوئیچ‌های دسترسی
۴۹۵,۴	کل توان مصرفی تجهیزات فناوری اطلاعات

حدود ۱۰۳ وات و سوئیچ‌های دسترسی در حدود ۹ وات مصرف برق داشته‌اند. میزان مصرف برق کارسازها در سناریوهای مختلف متفاوت است.

برای محاسبه سربار انرژی که در مرکز داده مصرف می‌شود، نیاز به دانستن مقدار انرژی مصرفی داریم که صرف روشنایی و خنک‌کننده مرکز داده می‌شود. برای محاسبه این مقدار ابتدا باید گرمای تولیدی توسط تجهیزات مرکز داده محاسبه شود.

به منظور محاسبه میزان گرمای تولیدی در مرکز داده باید مصارف برق را در بخش‌های مختلف محاسبه نمود.



شکل ۱: مرکز داده شبیه‌سازی شده فرضی: الف) نمای دو بعدی، ب) نمای سه بعدی

لینک‌های ارتباطی را انجام می‌دهد و دارای رابط کاربری قوی است. همچنین بالاترین میزان ارجاع در بین مقالاتی که شبیه‌سازی رایانش ابری داشتند، مرتبط با این شبیه‌ساز بوده است. این شبیه‌ساز در پژوهش‌های متعددی [۷] [۸] [۱۰] [۲۴] [۲۹] [۳۰] [۳۱] به‌عنوان ابزار تحلیل مراکز داده مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که این شبیه‌ساز مبتنی بر شبیه‌ساز شناخته شده شبکه (ns-2) توسعه پیدا کرده است، لذا از اعتبار بالایی برای استناد به نتایج آن برخوردار است. همچنین اعتبارسنجی نتایج حاصل از آن در پژوهشی مورد بررسی و تایید قرار گرفته است [۳۶].

بر اساس خروجی شبیه‌ساز میزان مصرف برق تجهیزات فناوری اطلاعات شامل سوئیچ‌ها و کارسازها مطابق با جدول ۳ محاسبه می‌شود. مقدار مصرف برق سوئیچ هسته حدود ۵۱ وات، سوئیچ‌های تجمیع جمعا

جدول ۴: نحوه محاسبه میزان گرمای تولیدی در مرکز داده [۴۱]

شرح	داده های مورد نیاز	نحوه محاسبه	گرما(وات)
تجهیزات فناوری اطلاعات	تجهیزات فناوری اطلاعات (وات)	جمع کل توان مصرفی تجهیزات فناوری اطلاعات از جدول (۴-۲)	۴۹۵
یو پی اس و باتری	نرخ مصرف برق (وات)	$(۰.۰۴ \times \text{توان کل}) + (۰.۰۵ \times \text{توان فناوری اطلاعات})$	۴۵
توزیع برق	نرخ مصرف برق (وات)	$(۰.۰۱ \times \text{توان کل}) + (۰.۰۲ \times \text{توان فناوری اطلاعات})$	۱۵
سیستم روشنایی	مساحت (متر مربع)	$۲۱.۵۳ \times \text{مساحت مرکز داده (متر مربع)}$ ( $۲۱.۵۳ \times ۱۱.۱۶$ )	۲۴۰
افراد	تعداد افراد در مرکز داده	هر نفر ۱۰۰ وات محاسبه میشود	۰
میزان حرارت تولیدی	موارد بالا	جمع موارد بالا	۷۹۵

جدول ۵: مصارف انرژی تجهیزات غیر فناوری اطلاعات مرکز داده

مصرف کننده	میزان مصرف (وات)
مصرف انرژی سیستم خنک کننده مرکز داده	۷۹۵
مصرف انرژی سیستم روشنایی مرکز داده	۱۵
مصرف انرژی سیستم های امنیتی مرکز داده	۱۰
جمع کل توان مصرفی غیر فناوری اطلاعات مرکز داده	۸۲۰

برای مرکز داده شبیه سازی شده، ۱۵ وات (به معنای دو قاب روشنایی فوق کم مصرف ۷/۵ وات) به صورت ثابت در نظر گرفته می شود. برای سایر مصرف کننده ها نظیر سیستم های امنیتی، اعلام و اطفاء حریق نیز مقدار ثابت ۱۰ وات را در کل سناریو در نظر گرفته ایم. بنابراین کل مصرف برق غیر فناوری اطلاعات این مرکز داده ۸۲۰ وات برآورد گردید. در جدول ۵ میزان مصارف غیر فناوری اطلاعات و حاصل جمع آن ها مشاهده می شود.

شبیه سازی در شش گام و به صورت مشروح در جدول ۶ اجرا خواهد شد. در گام اول که مرحله ثبت وضعیت موجود مرکز داده می باشد هیچ گونه بهینه سازی بر روی مرکز داده انجام نخواهد شد و وضعیت بدون مجازی سازی و بدون استفاده از فن DVFS ثبت می گردد. گام دوم شامل اضافه شدن گزینه DVFS به کارسازهای سخت افزاری در شبیه ساز است. در گام سوم بر روی هر کارساز فیزیکی دو ماشین مجازی تعریف نموده اما از گزینه DVFS استفاده نخواهد شد. در این حالت تعداد کارسازهای سخت افزاری نصف می شود. در گام چهارم، گزینه DVFS را نیز به گام سوم اضافه نموده و در گام های پنجم و ششم تنها تعداد ماشین های مجازی را افزایش خواهیم داد.

پیکربندی و همبندی سناریو به این صورت است که تعداد سوئیچ های هسته، سوئیچ های تجمیع و سوئیچ های دسترسی به ترتیب یک، دو و سه دستگاه در نظر گرفته شد

جدول ۴ میزان مصرف برق تجهیزات فناوری اطلاعات را نشان می دهد که از طریق شبیه ساز به دست آمده است. مصرف برق سایر تجهیزات را نیز می توان از طریق همین اطلاعات پایه محاسبه نمود. همچنین به منظور محاسبه دقیق تر این میزان گرما باید با استفاده از روابط میزان تلفات انرژی از طریق UPS و مسیرهای توزیع برق و نیز انرژی تلف شده در سیستم روشنایی را محاسبه نمود [۳۷]. کلیه محاسبات فوق در جدول ۴ انجام شده و میزان نهایی حرارت تولیدی در مرکز داده را در سطر آخر جدول می توان مشاهده نمود.

بر اساس سطر آخر جدول ۴، مقدار گرمای محاسبه شده ۷۹۵ وات است که همین مقدار را برای مصرف برق سیستم خنک کننده در نظر می گیریم. (با توجه به ظرفیت کوچک ترین اندازه کولر گازی که ۹۰۰۰ BTU بوده و مصرف برق آن حدود ۸۰۰ وات میباشد مقدار ۷۹۵ منطقی است.) به منظور محاسبه میزان مصرف برق سیستم روشنایی نیز با در نظر گرفتن متراژ ۱۱،۱۶ متر مربع



و این پیکربندی در کلیه گام‌های شبیه‌سازی یکسان است. در گام اول تعداد کارسازهای فیزیکی ۱۴۴ عدد بوده و این گام از هیچ روشی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی استفاده نشده تا میزان واقعی مصرف انرژی مرکز داده در حالت عادی ثبت شود.

جدول ۶ نشان‌دهنده تغییرات تعداد کارسازها در هر گام و نیز وضعیت فعال بودن یا غیر فعال بودن فن DVFS در آن گام را نشان می‌دهد. در گام دوم تنها به فعال‌سازی DVFS بر روی کارسازها و سوئیچ‌های شبکه پرداخته تا میزان بهینه‌سازی مصرف انرژی در این حالت بررسی شود. در گام سوم، فقط مجازی‌سازی داریم یعنی بر روی هر کارساز سخت‌افزاری دو ماشین مجازی ایجاد نموده و تعداد کارسازهای سخت‌افزاری را به نصف تقلیل می‌دهیم و از هیچ الگوریتم بهینه‌سازی مصرف انرژی در این زمینه استفاده نمی‌شود. در گام چهارم، به صورت همزمان از مجازی‌سازی به همراه DVFS استفاده می‌شود. بدین معنا که بر روی سناریوی گام سوم، گزینه DVFS هم فعال می‌گردد. در گام‌های پنجم و ششم، همانند مرحله چهارم عمل کرده، با این تفاوت که تعداد ماشین‌های مجازی در هر کارساز در گام‌های پنجم و ششم به ترتیب ۴ و ۶ عدد است.

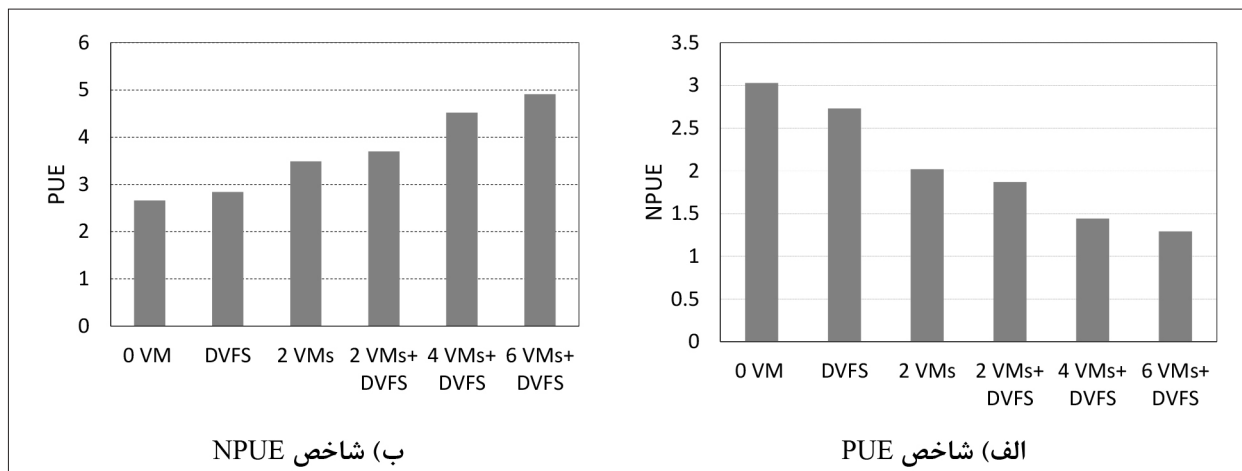
نتایج شبیه‌سازی در گام‌های شش‌گانه در جدول ۶ با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان بهبود شاخص NPUE در گام دوم شبیه‌سازی در حدود ۱۰ درصد بوده است که علت آن استفاده از الگوریتم DVFS برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش ولتاژ مصرفی تجهیزات پردازشی در زمان کسادی است. همچنین در هنگام استفاده از روش مجازی‌سازی و کاهش تعداد کارسازها از ۱۴۴ کارساز به ۷۲ کارساز با اجرای ۲ ماشین مجازی بر روی هر کارساز می‌توان حدود ۳۴ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی نمود که با افزودن گزینه DVFS به سناریوی قبلی این میزان صرفه‌جویی به حدود ۳۹ درصد افزایش یافت. با افزودن تعداد ماشین‌های مجازی باز هم میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی افزایش خواهد یافت.

دو شاخص PUE و NPUE در نمودارهای شکل ۳ مشاهده می‌شود. در نهایت شاخص PUE حدود دو برابر افزایش یافته است. بنابراین این تصور کاملاً اشتباه است که با کاهش مصرف انرژی در تجهیزات فناوری اطلاعات مرکز داده، شاخص PUE بهبود یابد.

شاخص NPUE در پایان سناریو حدود ۶۰ درصد بهبود داشته است اما شاخص PUE به این دلیل بهبود نیافته و بدتر شده است که با توجه به رابطه PUE، مقدار این شاخص نسبت انرژی مصرفی کارسازها و سوئیچ‌ها به میزان کل مصارف انرژی است و چون در سناریوی مجازی‌سازی، مصرف انرژی کارسازها حدوداً نصف گردیده و سایر مصارف (سربار) ثابت مانده، مقدار شاخص PUE افزایش دو برابری داشته است.

در صورتی‌که فقط بر روی کاهش مصرف انرژی در تجهیزات فناوری اطلاعات برنامه‌ریزی شود، به هر میزان که بتوانیم مصرف انرژی این تجهیزات را کاهش دهیم، شاخص PUE بالا خواهد رفت (در صورت ثابت بودن ضریب سربار) و لذا برای بهبود شاخص PUE به صورت پویا دو راهکار وجود دارد: ۱) استفاده از تجهیزات خنک‌سازی هوشمند و پویا که به اندازه گرمایش تولیدی در مرکز داده از سیستم سرمایش استفاده شود و ۲) تنظیم دستی پارامترهای سیستم های خنک‌کننده با توجه به کاهش مصرف انرژی در تجهیزات فناوری اطلاعات.

برای بهبود شاخص PUE باید در گام‌هایی که میزان مصرف انرژی تجهیزات فناوری اطلاعات کاهش می‌یابد، مقدار توان مصرفی سربار نیز متناسب با آن کاهش یابد. زیرا هنگامی که تعداد کارسازها کمتر شده، گرمایش کمتری نیز در مرکز داده تولید شده و در نتیجه مصرف انرژی تجهیزات خنک‌کننده نیز کاهش می‌یابد. در گام نهایی اقدام به محاسبه انرژی مورد نیاز تجهیزات خنک‌کننده مرکز داده اخیر با تعداد کارساز کمتر نموده و مجدداً شاخص PUE را محاسبه می‌نماییم. در این مرحله، در محاسبه میزان شاخص سربار یک ضریب به نام ضریب صرفه‌جویی را



شکل ۳: شاخص‌های انرژی در سناریوهای شبیه‌سازی

جدول ۶: سناریوهای شبیه‌سازی و نتایج آن

گام اول: بدون مجازی‌سازی و DVFS	گام دوم: بدون مجازی‌سازی با DVFS	گام سوم: بدون مجازی‌سازی با دو ماشین DVFS	گام چهارم: مجازی‌سازی با دو ماشین و DVFS	گام پنجم: مجازی‌سازی با چهار ماشین و DVFS	گام ششم: مجازی‌سازی با شش ماشین و DVFS		
۱	۱	۱	۱	۱	۱	تجهیزات سوئیچ هسته	
۲	۲	۲	۲	۲	۲	سوئیچ تجمیع	
۳	۳	۳	۳	۳	۳	سوئیچ دسترسی	
۲۴	۳۶	۷۲	۷۲	۱۴۴	۱۴۴	تعداد کارساز	
فعال	فعال	فعال	فعال	غیرفعال	غیرفعال	مجازی‌سازی	
۶	۴	۲	۲	۰	۰	تعداد ماشین بر کارساز	
فعال	فعال	فعال	غیرفعال	غیرفعال	غیرفعال	DVFS VMs	
فعال	فعال	فعال	غیرفعال	فعال	غیرفعال	DVFS Servers	
فعال	فعال	فعال	غیرفعال	فعال	غیرفعال	DVFS Switches	
۴۷,۲	۷۰,۷	۱۴۱,۲	۱۶۶,۱	۲۸۲,۳	۳۳۲,۱	انرژی مصرفی کارسازها	توان مصرفی
۵۱,۴	۵۱,۴	۵۱,۴	۵۱,۴	۵۱,۴	۵۱,۴	انرژی مصرفی سوئیچ هسته	
۱۰۲,۸	۱۰۲,۸	۱۰۲,۸	۱۰۲,۸	۱۰۲,۸	۱۰۲,۸	انرژی مصرفی سوئیچ‌های تجمیع	
۸,۲	۸,۳	۸,۵	۸,۵	۹,۱	۹,۱	انرژی مصرفی سوئیچ‌های دسترسی	
۲۰۹,۶	۲۳۲,۲	۳۰۳,۹	۳۲۸,۸	۴۴۵,۶	۴۹۵,۴	کل انرژی تجهیزات فناوری اطلاعات	
۸۲۰	۸۲۰	۸۲۰	۸۲۰	۸۲۰	۸۲۰	جمع مصرف تجهیزات غیر فناوری اطلاعات	
۱۰۲۹,۹۵	۱۰۵۳,۵۵	۱۱۲۴,۲۵	۱۱۴۹,۱۵	۱۲۶۵,۹۵	۱۳۱۵,۷۵	جمع کل توان مصرفی مرکز داده	
۱,۲۹	۱,۴۴	۱,۸۷	۲,۰۲	۲,۷۳	۳,۰۳	NPUE	شاخص‌های انرژی
۴,۹۱	۴,۵۲	۳,۷۰	۳,۴۹	۲,۸۴	۲,۶۶	PUE	

جدول ۷: محاسبه مجدد شاخص PUE با استفاده از مقدار سر بار پویا

سناریو	بدون مجازی سازی	بدون مجازی سازی + DVFS	مجازی سازی با دو ماشین	مجازی سازی با چهار ماشین + DVFS	مجازی سازی با شش ماشین + DVFS
(بدون خنک کننده هوشمند) PUE	۲,۶۶	۲,۸۴	۳,۴۹	۴,۵۲	۴,۹۱
ضریب صرفه جویی	۰,۰۰	۰,۱۰	۰,۳۴	۰,۵۲	۰,۵۸
مصرف برق غیر فناوری اطلاعات با ضریب صرفه جویی	۸۲۰,۳۵	۷۳۷,۸۹	۵۴۴,۴۷	۳۸۶,۱۷	۳۴۷,۰۹
(با خنک کننده هوشمند) PUE	۲,۶۶	۲,۶۶	۲,۶۶	۲,۶۶	۲,۶۶

دخیل می‌کنیم که مقدار آن از جدول ۵ استخراج شده است. این مقدار دقیقاً همان درصدی است که در گام‌های مختلف شبیه‌سازی، مصرف انرژی مرکز داده کاهش یافته بود. با اعمال این ضریب و محاسبه مجدد شاخص PUE (مطابق جدول ۷) به این نتیجه رسیدیم که به دلیل کاهش مصرف انرژی سر بار که به نسبت میزان صرفه‌جویی مصرف انرژی هر گام است، شاخص PUE برای کلیه سناریوها یکسان و کمینه مقدار می‌شود.

#### ۴. نتیجه گیری

پس از بررسی مشاهدات و نتایج این پژوهش و شبیه‌سازی به این نتیجه می‌رسیم که بهینه‌سازی مصرف انرژی در مراکز داده باید به صورت پویا و همه جانبه انجام شود. بهینه‌سازی تک بعدی نتیجه مطلوب و منطقی نخواهد داشت. این بدان معناست که با توجه به این که مصرف انرژی سیستم‌های سر بار ارتباط مستقیم با مصرف انرژی تجهیزات فناوری اطلاعات دارد. لذا اگر مصرف انرژی تجهیزات فناوری اطلاعات را با هر روشی کاهش داده ولی مصرف سر بار کاهش نیابد، در این صورت مقدار زیادی انرژی به صورت مصارف سر بار تلف می‌شود. به منظور ایجاد بهبود مصرف انرژی در مرکز داده باید از تلفیق چند روش استفاده نمود و بسته به بودجه و امکانات در اختیار می‌توان تا حد قابل قبولی شرایط مراکز داده فعلی

را بهبود بخشید. در مراکز داده تازه تأسیس نیز یکی از مهم‌ترین نکات، استفاده از تجهیزات کم مصرف با بازدهی بالا می‌باشد که در بدو طراحی باید مورد توجه قرار گیرد. برای مدیریت انرژی در مراکز داده قدیمی، ابتدا باید بر روی روش‌های کاهش مصرف انرژی نرم‌افزاری سرمایه‌گذاری نمود و سپس با تجمیع کارسازها و تجهیزات نیاز به سرمایه‌گذاری این محل را به حداقل رساند و همچنین ارزان‌ترین روش بهینه‌سازی را پیاده‌سازی کرد. در پژوهش‌های بعدی می‌توان بر روی شاخص DNS متمرکز شد و نتایج آن را با نتایج این پژوهش تلفیق نمود و حتی یک روش تلفیقی جدید برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در مراکز داده پیشنهاد داد. یکی دیگر از جنبه‌های مهم در این بخش، هوشمندسازی خنک‌کننده‌ها با توجه به روش‌های بهینه‌سازی در مرکز داده است.

#### مراجع

۱. متن کامل قانون هدفمند کردن یارانه‌ها. "۱۳۸۸".
۲. سیاست‌های کلی اصلاح الگوی مصرف. ۱۳۸۹.
۳. قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی. ۱۳۹۰.
4. M. Sharma, K. Arunachalam, and D. Sharma, "Analyzing the Data Center Efficiency by Using PUE to Make Data Centers More Energy Efficient by Reducing the Electrical Consumption and Exploring New Strategies," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 48, no. Iccce, pp. 142–148, 2015.
5. J. Cho and Y. Kim, "Improving energy efficiency of dedicated cooling system and its contribution towards meeting an energy-optimized data center," *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 967–982, 2016.
6. M. Dayarathna, Y. Wen, and R. Fan, "Data Center Energy

- between a datacenter and neighboring buildings through an underground loop,” *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 502–509, 2016.
22. Taniguchi, Yoshiaki, Koji Suganuma, Takaaki Deguchi, Go Hasegawa, Yutaka Nakamura, Norimichi Ukita, Naoki Aizawa, Katsuhiko Shibata, Kazuhiro Matsuda, and Morito Matsuoka., “Tandem Equipment Arranged Architecture with Exhaust Heat Reuse System for Software-defined Data Center Infrastructure,” *IEEE Trans. Cloud Comput.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–1, 2015.
  23. P. Pue, D. Azevedo, J. Cooley, M. Patterson, and M. Blackburn, “Data Center Efficiency Metrics : Presenters,” 2011.
  24. D. Kliazovich, P. Bouvry, F. Granelli, and N. L. S. Da Fonseca, “Energy Consumption Optimization in Cloud Data Centers,” 2016.
  25. T. Le, A. Tuan, and L. Anh, “Workload prediction for resource management in data centers,” 2016.
  26. B. Rahmati, A. M. Rahmani, and A. Rezaei, “Data Replication-Based Scheduling in Cloud Computing Environment,” *J. Adv. Comput. Eng. Technol.*, vol. 0, no. 0, 2017.
  27. S. B. Shaw and A. K. Singh, “Use of proactive and reactive hotspot detection technique to reduce the number of virtual machine migration and energy consumption in cloud data center,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 47, pp. 241–254, 2015.
  28. R. Rai, G. Sahoo, and S. Mehfuz, “Effect of VM Selection Heuristics on Energy Consumption and SLAs During VM Migrations in Cloud Data Centers,” Springer, Singapore, 2017, pp. 189–199.
  29. Liu, Liang, Hao Wang, Xue Liu, Xing Jin, Wen Bo He, Qing Bo Wang, and Ying Chen. «GreenCloud: a new architecture for green data center.» In Proceedings of the 6th international conference industry session on Autonomic computing and communications industry session, pp. 29–38. ACM, 2009.
  30. Gill, Beant Singh, S. K. Gill, and Prince Jain. «Analysis of energy aware data center using green cloud simulator in cloud computing.» *International Journal of Computer Trends and Technology* 5, no. 3 (2013): 154–159.
  31. D. Kliazovich, P. Bouvry, and S. U. Khan, “DENS: Data center energy-efficient network-aware scheduling,” *Cluster Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 65–75, 2013.
  32. T. Kaur and I. Chana, “Energy Efficiency Techniques in Cloud Computing: A Survey and Taxonomy,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 48, no. 2, pp. 1–46, 2015.
  33. E. K. Lee, H. Viswanathan, and D. Pompili, “Proactive Thermal-aware Resource Management in Virtualized HPC Cloud Datacenters,” *IEEE Trans. Cloud Comput.*, vol. PP, no. 99, p. 1, 2015.
  34. Jin, X., Zhang, F., Vasilakos, A.V. and Liu, Z., 2016. Green data centers: A survey, perspectives, and future directions. arXiv preprint arXiv:1608.00687.
  35. Datacenter Journal. [Online]. Available: <http://www.datacenterjournal.com/road-smart-data-center/>.
  36. Msc. Enida Sheme and A. N. Frasher, “Overview and Comparison of Software Tools for Power Management in Data Centers,” 2016, p. 26.
  37. A packet-level simulator of energy-aware cloud computing data centers,” *J. Supercomput.*, vol. 62, no. 3, pp. 1263–1283, 2012.
  - Consumption Modeling : A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. September, pp. 1–1, 2015.
  7. C. Fiandrino, S. Member, D. Kliazovich, and S. Member, “Performance and Energy Efficiency Metrics for Communication Systems of Cloud Computing Data Centers,” pp. 1–14, 2015.
  8. B. R. M. S. Premalatha, “Green Scheduling of Bag-of-tasks Applications in Cloud Data Center Using GreenCloud Simulator,” *J. Emerg. Technol. Web Intell.*, vol. 6, no. 3, pp. 273–279, 2014.
  9. Shehabi, Arman, Sarah Smith, Dale Sartor, Richard Brown, Magnus Herrlin, Jonathan Koomey, Eric Masanet, Nathaniel Horner, Inês Azevedo, and William Lintner. «United states data center energy usage report.» (2016).
  10. S. S. Pandya, “Green Cloud Computing,” vol. 4, no. 4, pp. 431–436, 2014.
  11. A. D. Schlichting and D. Ph, “Data Center Energy Efficiency Technologies and Methodologies A Review of Commercial Technologies and Department of Defense Systems Secretary of Defense for Research and Engineering ’s Reliance 21 Energy & Power Community of Interest,” 2016.
  12. H. Endo, H. Kodama, H. Fukuda, T. Sugimoto, T. Horie, and M. Kondo, “Effect of climatic conditions on energy consumption in direct fresh-air container data centers,” 2013 *Int. Green Comput. Conf. Proceedings, IGCC 2013*, vol. 6, pp. 17–25, 2013.
  13. Zhao, Yiran, Shen Li, Shaohan Hu, Hongwei Wang, Shuochao Yao, Huajie Shao, and Tarek Abdelzaher. «An experimental evaluation of datacenter workloads on low-power embedded micro servers. Proc. VLDB Endow., vol. 9, no. 9, pp. 696–707, 2016.
  14. A. Jain and S. Taneja, “Money saving advantage Analysis of Datacenter Consolidation Using Global Virtual Datacenter Online Calculator and VMware ROI TCO Calculator,” vol. 3, no. 1, pp. 26–35, 2016.
  15. Bilal, Kashif, Saif Ur Rehman Malik, Osman Khalid, Abdul Hameed, Enrique Alvarez, Vidura Wijaysekara, Rizwana Irfan., “A taxonomy and survey on Green Data Center Networks,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 36, pp. 189–208, 2014.
  16. Hwang and M. Pedram, “A Comparative Study of the Effectiveness of CPU Consolidation Versus Dynamic Voltage and Frequency Scaling in a Virtualized Multicore Server,” *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 24, no. 6, pp. 2103–2116, 2016.
  17. L. Z. J. S. Devins, “GDC\_SimulatorIntroduction.pdf.” 2015.
  18. Z. Tang, L. Qi, Z. Cheng, K. Li, S. U. Khan, and K. Li, “An Energy-Efficient Task Scheduling Algorithm in DVFS-enabled Cloud Environment,” *J. Grid Comput.*, vol. 14, no. 1, pp. 55–74, 2016.
  19. Y. Fulpagare and A. Bhargav, “Advances in data center thermal management,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 981–996, 2015.
  20. S.-W. Ham and J.-W. Jeong, “Impact of aisle containment on energy performance of a data center when using an integrated water-side economizer,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 105, pp. 372–384, 2016.
  21. D. Paludetto and S. Lorente, “Modeling the heat exchanges